



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Patentschrift**  
⑩ **DE 199 02 056 C 1**

⑤ Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**G 05 B 13/04**  
G 06 F 17/60

⑲ Aktenzeichen: 199 02 056.6-51  
⑳ Anmeldetag: 20. 1. 1999  
㉑ Offenlegungstag: -  
㉒ Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 19. 10. 2000

DE 199 02 056 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑲ Patentinhaber:  
DaimlerChrysler AG, 70567 Stuttgart, DE

⑲ Erfinder:  
Daferner, Martin, Dipl.-Ing. (FH), 71065  
Sindelfingen, DE

⑤ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

DE 196 43 884 A1  
US 52 29 948 A

at-Automatisierungstechnik 46 (1998) 1, S.15-21;

⑤ Verfahren zur Festlegung einer Auftragsreihenfolge für Fertigungsanlagen

⑤ Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Festlegung einer Auftragsreihenfolge bei auftragsorientierter Fertigung, insbesondere bei der Fahrzeugherstellung. Hierzu wird jedem Einzelauftrag ein Satz von Merkmalen zugeordnet, der die kostenrelevanten Anforderungen dieses Einzelauftrags an Produktions- und Montageeinrichtungen bzw. -personal beschreibt. Diese Merkmale lassen sich - in Abhängigkeit von fertigungslogistischen Eigenschaften der Merkmale - in zwei Klassen (dichte- und der abstandsorientierte Merkmale) aufteilen. Für jedes Merkmal wird eine Einzelbewertungsfunktion berechnet, die eine vorgegebene Auftragsreihenfolge in bezug auf die Fertigungskosten dieses Merkmals beschreibt. Die Gesamtbewertungsfunktion der Auftragsreihenfolge in bezug auf alle Merkmale ergibt sich als eine Linearkombination aller Einzelbewertungsfunktionen. Die Berechnung der kostengünstigsten Auftragsreihenfolge erfolgt mit Hilfe genetischer Algorithmen, wobei die Gesamtbewertungsfunktion als Fitneßfaktor verwendet wird.

DE 199 02 056 C 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Festlegung einer Auftragsreihenfolge für Fertigungsanlagen, insbesondere bei der Fahrzeugherstellung.

In der Automobilproduktion erfolgt die Herstellung des Fahrzeugs in mehreren sequentiell ablaufenden Schritten: Zunächst werden die Rohkarossen aus mehreren Preßteilbaugruppen zusammengesetzt und nachfolgend lackiert. Dann werden sie in den Montagebereich gebracht, in dem die Funktionalbaugruppen wie Fahrwerk und Achsen und die in Abhängigkeit von der Modellvariante anfallenden Sonderausstattungen wie Schiebedächer, elektrische Fensterheber, Klimaanlage etc. montiert werden. Die Montage erfolgt entlang hintereinander geschalteter Montagebänder und Einzelstationen, in denen spezialisierte Teams jeweils eine bestimmte Montageaufgabe ausführen.

Je nach Modellvariante, Farbe und Ausstattung erzeugt ein den Rohbau, die Lackierung und den Montagebereich durchlaufendes Fahrzeug unterschiedliche Maschinenauslastungen und Arbeitsbelastung in den jeweiligen Arbeitsstationen. Die Reihenfolge, in der die Modelle durch diese Bereiche geschleust werden, hat somit entscheidende Bedeutung für die Auslastung der Arbeitsstationen. Zur Optimierung der Gesamtfertigungskosten ist, es wichtig, die Auftragsreihenfolge so festzulegen, daß die Auslastung der Lackierstraßen, Montagebänder, Sondermontagestationen etc. möglichst gleichmäßig erfolgt und möglichst nahe bei 100% liegt. Die Auswahl der günstigsten Auftragsreihenfolge stellt hierbei eine äußerst komplexe Aufgabe dar: Wegen der großen Zahl der Einflußgrößen (Modellvariante, Farbe, Sonderausstattungen etc.) und der Komplexität der Auswirkungen des jeweiligen Modell-Mixes auf die Gesamtauslastung ist eine Überwachung aller Randbedingungen und eine manuelle Optimierung des Montageprozesses nahezu unmöglich.

Die Problematik der Bestimmung optimierter Produktionsparameter in einem komplexen Produktionsprozeß ist z. B. aus der US 5 229 948 und der DE 196 43 884 bekannt. Die DE 196 43 884 beschreibt – am Beispiel eines Prozesses zur Zellstoffherstellung in der Papierindustrie – die Optimierung der Prozeßführung mit Hilfe von genetischen Algorithmen. Die Aufgabe besteht hierbei darin, einen optimalen Satz von Stellgrößen zu finden, der den Produktionsprozeß zu einem optimalen Ergebnis führt. Im Gegensatz zur DE 196 43 884, die sich mit der Optimierung konkurrierender Stellgrößen in einem einzigen Prozeßschritt befaßt, beschäftigt sich die US 5 229 948 mit der Optimierung eines mehrstufigen, vernetzten Produktionsprozesses mit mehreren Pufferstationen. Hierfür wird ein stochastisches Modell vorgeschlagen, das den gesamten Produktionsprozeß abbilden und den Zufallscharakter einiger der Variablen (z. B. Maschinenverfügbarkeit) explizit in die Betrachtungen einbeziehen soll. Das Ziel dieses Verfahrens besteht in einer Modellierung des Herstellungsprozesses, insbesondere im Hinblick auf eine Optimierung der Pufferstationen. Die Auftragssequenz spielt hier nur eine nebengeordnete Rolle.

Weiterhin beschreibt die Veröffentlichung "Produktionsreihenfolgeplanung in Ringwalzwerken mit wissensbasierten und evolutionären Methoden" (R. Mikut und F. Hendrich in at-Automatisierungstechnik 46, Oldenbourg Verlag 1998, S. 15–21) einen Lösungsansatz zur Bestimmung einer optimierten auftragsorientierten Produktionsreihenfolge in einem Walzwerk. Die einzelnen Produktionsstufen (Walzprogramm, Sägeprogramm) werden hierbei getrennt betrachtet. Basierend auf einer Gütefunktionen, die die Restriktionen der jeweiligen Produktionsstufe explizit berücksichtigt, wird mit Hilfe evolutionärer Algorithmen die opti-

male Auftragsreihenfolge für diese Produktionsstufe berechnet. Allerdings ermöglicht das hier vorgeschlagene Modell keine Bestimmung einer fabrikübergreifend optimierten Auftragsreihenfolge, in der sämtliche am Herstellprozeß beteiligten Produktionsstufen so berücksichtigt werden, daß die Gesamtkosten über den gesamten sequentiellen Produktionsprozeß erfaßt und minimiert werden können.

Ausgehend von diesem Stand der Technik verfolgt die vorliegende Arbeit die Zielsetzung, für einen mehrstufigen, sequentiellen, vernetzten Produktionsprozeß diejenige Auftragsreihenfolge zu bestimmen, die eine Minimierung der Gesamtkosten gestattet. Ein zentraler Baustein und wichtige Voraussetzung für die der vorliegenden Erfindung zugrundeliegende Problematik der Bestimmung dieser optimalen Auftragsreihenfolge ist dabei eine realistische Beschreibung und relative Gewichtung der Auslastungsziele der verschiedenen am Prozeß beteiligten Arbeitsstationen. Andererseits muß die Vielzahl der unterschiedlichen Restriktionen, die an den einzelnen Produktionsstufen auftreten und die Auftragsreihenfolge beeinflussen, möglichst einheitlich beschreibbar sein.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein einfaches und flexibles Verfahren zur Festlegung einer kostenoptimierten Auftragsreihenfolge für Fertigungsanlagen, insbesondere in Automobilrohbau, Automobillackierung und Automobilmontage vorzuschlagen, das auf quantitativen und realistischen Modellen für die Auslastungsziele der Einzelgewerke und Einzelstationen beruht.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst.

Danach wird jedem Einzelauftrag, also jedem zu fertigenden Fahrzeug, zunächst ein Satz von Merkmalen zugeordnet, der die Anforderungen dieses Einzelauftrags an die bereitzustellenden Fertigungskapazitäten beschreibt. Solche Merkmale sind z. B. Modell, Farbe und Motorisierung des Fahrzeugs sowie Sonderwünsche wie Schiebedach oder Klimaanlage etc. Die zugehörigen Fertigungskapazitäten sind z. B. eine geeignete Farbstraße in der Lackierung, ein geeignetes Montageband sowie Montageteams für Schiebedach, Klimaanlage etc.

Bei der Zusammensetzung einer Auftragsreihenfolge aus einer Sequenz von Einzelaufträgen entsteht für jedes Merkmal eine Merkmalsreihenfolge, die einen direkten Einfluß hat auf die Auslastung der für dieses Merkmal benötigten Fertigungskapazitäten und -ressourcen. Tritt das Merkmal in dieser Reihenfolge an manchen Stellen gehäuft auf, so kann dies zu Überlastungen der zugehörigen Fertigungskapazitäten und -ressourcen führen. Tritt andererseits das Merkmal an manchen Stellen der Reihenfolge sehr selten auf, so sind die zugehörigen Fertigungskapazitäten und -ressourcen nicht ausgelastet. Beide Fälle verursachen Zusatzkosten, weswegen sie bei der Optimierung der Auftragsreihenfolge wenn irgend möglich vermieden werden sollten.

Um die mit einem gehäuftem Auftreten eines Merkmals in einer Auftragsreihenfolge verbundenen Kosten quantitativ fassen zu können, ist es zweckmäßig, zunächst für jedes Merkmal eine Einzelbewertungsfunktion zu berechnen, die einen Gütefaktor der jeweiligen Auftragssequenz bezüglich dieses Merkmals darstellt. Die Einzelbewertungsfunktionen werden dann zu einer Gesamtbewertungsfunktion für die Gesamtheit aller Merkmale zusammengeführt. Diese Gesamtbewertungsfunktion, Modelmixgüte genannt, wird zweckmäßigerweise durch eine gewichtete Kombination der Einzelbewertungsfunktionen gebildet, wobei die relativen Gewichte der Einzelfunktionen die relative Kostenrelevanz der Einzelmerkmale abbilden. Die relativen Kosteneinflüsse unterschiedlicher Merkmale können somit sehr flexibel in die Modellierung des Gesamtsystems einbezogen

werden.

Zur quantitativen Modellierung der Kosteneinflüsse unterschiedlicher Merkmale werden die Merkmale in zwei Klassen eingeteilt: die abstandsorientierten und die dichteorientierten Merkmale.

Bei den abstandsorientierten Merkmalen sind die an diesem Merkmal beteiligten Werker- bzw. Anlagenkapazitäten auf einen vorgegebenen Mindestabstand ausgelegt, mit dem das Merkmal in der Auftragsreihenfolge auftritt. Erscheint das Merkmal in der Auftragsreihenfolge mit einem geringeren Abstand als diesem Mindestabstand, so erhöht sich die Belastung der beteiligten Werker bzw. Anlagen. Je geringer der Abstand, desto kostenrelevanter ist im Regelfall diese Merkmalssequenz, was zweckmäßigerweise durch ein nichtlineares Ansteigen der Gewichtungsfaktoren bei Verringerung des Abstands modelliert wird (siehe Patentanspruch 2). Ein Teil der Montage Merkmale, insbesondere alle vergleichsweise selten auftretenden Sonderausstattungen (z. B. Einbau einer Klimaanlage, eines Schiebedachs, eines Bremsassistenten, einer USA-Sonderausstattung, einer für schwere Dieselmotoren benötigten Zusatzheizung etc.), ist der Klasse der abstandsorientierten Merkmale zuzurechnen.

Bei den dichteorientierten Merkmalen hingegen sind die an diesem Merkmal beteiligten Werker- bzw. Anlagenkapazitäten auf eine vorgegebene Maximaldichte ausgelegt, mit der das Merkmal in der Auftragsreihenfolge auftritt. Tritt das Merkmal in der Auftragsreihenfolge mit einer höheren Dichte in Erscheinung, so erhöht sich die Belastung der Werker bzw. Anlagen während der Abarbeitung der in einem Auftragsblock befindlichen Aufträge. Bei dichteorientierten Merkmalen werden die Gewichtungsfaktoren zur Berechnung der Einzelbewertungsfunktion zweckmäßigerweise so modelliert, daß sie bei Erhöhung der Merkmalsdichte linear ansteigen (siehe Patentanspruch 3). Dichteorientiert sind typischerweise diejenigen Merkmale, welche in der Auftragssequenz mit einer relativ hohen Häufigkeit auftreten. Hierzu gehört z. B. einerseits die Lackfarbe der Karosserie, andererseits die in hoher Häufigkeit auftretenden Montage Merkmale wie die Baureihe, Motorvariante, Automatik-/Schaltgetriebe, Farbe der Sitzbezüge etc.

Die erfindungsgemäße Berechnung der Modelmixgüte mit Hilfe der Einzelbewertungsfunktionen hat den Vorteil, daß alle kostenrelevanten Faktoren, die durch die Auftragsreihenfolge beeinflusst werden, konkret und flexibel bewertet werden können. Insbesondere kann für jedes Merkmal gesondert eine Bewertung der Auftragsreihenfolge durchgeführt werden, in die empirisch gewonnene Kostenwerte einfach und flexibel einfließen können. Die relative Gewichtung der einzelnen Merkmale in der Modelmixgüte ermöglicht weiterhin eine einfache Stärkerbewertung besonders kostenrelevanter Merkmale, ohne die anderen Merkmale außer acht zu lassen.

Im letzten Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens wird schließlich aus der Vielzahl aller (prinzipiell) möglichen Auftragsreihenfolgen diejenige ausgewählt, die die geringsten Gesamtkosten verursacht, die sich also durch einen Minimalwert der Modelmixgüte auszeichnet (siehe Patentanspruch 4). Zur Berechnung dieser (optimalen) Auftragsreihenfolge empfiehlt sich gemäß dem Patentanspruch 5 die Methode der genetischen Algorithmen: Ausgehend von mehreren (beliebigen) Ausgangssequenzen werden diese Sequenzen schrittweise verändert, wobei zur Erzeugung einer neuen Sequenz einerseits Kombinationen mehrerer vorhergehender Sequenzen ("Crossover"), andererseits auch willkürlich erzeugte, lokale Änderungen ("Mutationen") in der Sequenz zugelassen werden. Nach jeder Änderung einer Sequenz wird geprüft, ob die neu entstandene Sequenz "besser" ist als die vorhergehende. Die Bewertung der Qualität

der Sequenz relativ zu anderen Sequenzen erfolgt mit Hilfe eines sogenannten Fitneß-Faktors so, daß sich die "optimale" Sequenz durch einen "besten" Fitneß-Faktor auszeichnet. Im vorliegenden Verfahren zur Bestimmung der kostengünstigsten Auftragsreihenfolge wird als Fitneß-Faktor zweckmäßigerweise die Gesamtbewertungsfunktion verwendet.

Die Methode der genetischen Algorithmen bieten den Vorteil, daß sie in vielen Fällen schneller und zuverlässiger konvergiert als andere Lösungsverfahren und daß sie auch bei schwierigen Optimierungsproblemen einsetzbar sind. Sie bietet sich daher besonders an für die vorliegende komplexe Problematik der Bestimmung einer fertigungslogistisch optimalen Auftragsreihenfolge.

Durch geeignete Auswahl der Operatoren, mit Hilfe derer die "Crossovers" erzeugt werden, kann der rechnerische Aufwand hierbei klein gehalten werden; eine geeignete Durchführung der "Mutationen" sorgt andererseits dafür, daß der gesamte dem System zur Verfügung stehende Phasenraum abgesucht und somit die "global" optimale Auftragsreihenfolge gefunden wird, anstatt nur einen Teil des Phasenraumes zu überprüfen und somit eine "lokale" Optimierung der Auftragsreihenfolge vorzunehmen.

Im folgenden wird die Erfindung anhand eines in den Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispiels erläutert. Dabei zeigen:

Fig. 1 Beispiele verschiedener Merkmale,

Fig. 2 eine Auftragssequenz, bestehend aus 20 Einzelaufträgen,

Fig. 3a eine Sequenz eines abstandsorientierten Merkmals,

Fig. 3b eine Gewichtungsfunktion eines abstandsorientierten Merkmals,

Fig. 4a eine Sequenz eines dichteorientierten Merkmals,

Fig. 4b eine Gewichtungsfunktion eines dichteorientierten Merkmals.

Das folgende Beispiel befaßt sich mit der Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Festlegung der Auftragsreihenfolge in der Automobilindustrie. Jeder Einzelauftrag entspricht einem Fahrzeug, das gefertigt werden soll. Jedem Einzelauftrag wird ein Satz von Merkmalen zugeordnet, der alle diejenigen (Bestell-) Informationen enthält, die fertigungslogistisch für die Herstellung des Fahrzeugs relevant sind. Beispiele solche Merkmale sind z. B. die Oberflächenfarbe (durch die der Bedarf des Einzelauftrags in bezug auf die Lackierung beschrieben wird), die Modellvariante (die die Karosseriefertigung im Rohbau sowie die Bereitstellung eines geeigneten Montagebandes beeinflusst), die Sonderausstattungen (die das Vorhandensein des hierfür benötigten Montageteams und/oder eines zu montierenden Zulieferteils voraussetzt), etc. Ein Auszug einer Tabelle dieser Merkmale ist in Fig. 1 dargestellt.

Aus den eingegangenen Einzelaufträgen wird eine Auftragsreihenfolge  $R_0$  zusammengestellt. Diese Auftragsreihenfolge  $R_0$  entspricht z. B. der Abfolge der an einem bestimmten Tag in einem Automobilwerk zu fertigenden Fahrzeuge. Fig. 2 zeigt ein Beispiel der ersten 20 Einzelaufträge einer Auftragsreihenfolge  $R_0$ . Der erste Einzelauftrag, ganz rechts außen grau unterlegt dargestellt, entspricht einem weißen Fahrzeug mit 4-Gang-Schaltgetriebe ohne Sonderausstattung. Der 18. Einzelauftrag, ebenfalls grau unterlegt dargestellt, entspricht einem surfblauen Fahrzeug mit 5-Gang-Schaltgetriebe und elektrischen Fensterhebern. Zusätzliche Einzelaufträge werden von links an das linke Ende der Tabelle, d. h. nach dem 20. Einzelauftrag, angefügt.

Die typische Anzahl der Einzelaufträge, die in einem großen Automobilwerk im Laufe eines Tages bearbeitet werden, liegt zwischen 1000 und 2000. Um die große Zahl von

Fahrzeugen, die hinter den Einzelaufträgen stehen, kostengünstig fertigen zu können, muß die Reihenfolge, in der die Einzelaufträge das Werk durchlaufen, bestimmte Anforderungen erfüllen. Unter der Annahme, daß der Einbau einer Klimaanlage eine verhältnismäßig zeitaufwendige Angelegenheit ist, ist z. B. die in Fig. 2 gezeigte Auftragssequenz  $R_0$  nicht besonders günstig: Hier wird in drei aufeinanderfolgenden Einzelaufträgen (Nr. 3, 4 und 5) der verhältnismäßig zeitaufwendige Einbau einer Klimaanlage verlangt; fertigungslogistisch bedeutet dies, daß zu diesem Zeitpunkt entweder drei Klimaanlage-Montageteams bereitstehen müssen (die dann allerdings später in der Auftragsreihenfolge  $R_0$  eventuell eine lange Zeit nicht ausgelastet sind), oder daß die den Einzelaufträge 4 und 5 entsprechenden Fahrzeuge in eine Pufferstation verbracht werden müssen, in der sie so lange verbleiben, bis das einzige Klimaanlage-Montageteam mit dem Einbau der Klimaanlage in das Fahrzeug von Einzelauftrag 3 fertig ist. Beide Alternativen verursachen Zusatzkosten und sind daher ungünstig.

Daher besteht der Bedarf, die ursprüngliche, in Fig. 2 dargestellte Auftragsreihenfolge  $R_0$  so umzusortieren, daß eine möglichst kostengünstige Abarbeitung der Einzelaufträge resultiert. Ziel hierbei ist es, die Merkmale nicht gehäuft auftreten zu lassen, sondern möglichst einen gleichen Abstand oder eine gleiche Dichte der Merkmale zu erreichen. Abhängig von den fertigungslogistisch mit den Merkmalen verbundenen Eigenschaften unterscheidet man zwischen abstandsorientierten und dichteorientierten Merkmalen:

Abstandsorientierte Merkmale zeichnen sich dadurch aus, daß sie in den Einzelaufträgen relativ selten auftreten. So treten z. B. abstandsorientierte Montagemerkmale im statistischen Mittel mit einer Häufigkeit von weniger als etwa 30% auf. Um einen Einzelauftrag mit einem abstandsorientierten Merkmal (z. B. Klimaanlage) zu versehen, wird typischerweise ein Montageteam bzw. eine Fertigungsanlage benötigt, das bzw. die zur Verwirklichung (z. B. Einbau) dieses Merkmals eine bestimmte Zeitspanne benötigt und daher während dieser Zeit nicht für weitere Montagearbeiten zur Verfügung steht. Sollen z. B., wie in Fig. 2 gezeigt, in rascher Folge mehrere Fahrzeuge mit Klimaanlage gefertigt werden, so hat dies eine hohe Auslastung bzw. Überlastung des Klimaanlage-Montageteams zur Folge; im Extremfall müssen weitere Teams angefordert werden bzw. die betreffenden Karossen aus dem Fertigungsstrom aussteuert werden. Wenn der Einbau einer Klimaanlage z. B. einen zeitlichen Aufwand  $T_{\text{Klima}}$  von 50 Taktzeiten bedeutet, und wenn nur ein einziges Klimaanlage-Montageteam zur Verfügung steht, so ist es unter Kostengesichtspunkten günstig, in der Auftragsreihenfolge zwischen zwei Einzelaufträgen, die eine Klimaanlage beinhalten, jeweils einen Abstand von (mindestens) 50 Fahrzeugen einzuhalten. Der optimale Mindestabstand  $i(\text{opt})$  zwischen aufeinanderfolgendem Auftreten des abstandsorientierten Merkmals "Klimaanlage" beträgt somit den Wert 50. Solange dieser Abstand  $i(\text{opt})$  eingehalten wird, kann das Klimaanlage-Montageteam nämlich, dem Fertigungsstrom folgend, in ein erstes Fahrzeug eine Klimaanlage einbauen, nach Beendigung dieser Montage-tätigkeit an den Ausgangspunkt in der Fertigungskette zurückkehren und dort das nächste Fahrzeug zum Einbau der Klimaanlage in Empfang nehmen.

Fig. 3a zeigt einen Ausschnitt aus einer Einzelauftragssequenz  $R^A$  eines abstandsorientierten Merkmals A mit Mindestabstand  $i(\text{opt}) = 5$ . An einer Stelle zeigt diese Sequenz  $R^A$  einen Abstand = 4 zwischen zwei Einzelaufträgen, die dieses Merkmal A aufweisen. Dieser Abstand  $i$  ist kleiner als der optimale Mindestabstand  $i(\text{opt})$ , auf den die Werker und/oder Anlagen (bei 100%iger Auslastung) ausgelegt sind und führt daher bei der Abarbeitung der Auftragssequenz

$R^A$  zu einer Erhöhung der Belastung der Werker und/oder Anlagen. Diese Belastungserhöhung ist um so gravierender, je stärker der aktuell vorliegende Abstand  $i$  vom Mindestabstand  $i(\text{opt})$  nach unten hin abweicht. Im vorliegenden Beispiel wird diese Belastungserhöhung modelliert durch ein geometrisches Ansteigen der Gewichtungsfunktion  $f^A(i, i(\text{opt}))$  bei abnehmenden Abständen  $i$  zwischen zwei Einzelaufträgen, die dieses Merkmal A aufweisen (siehe Fig. 3b).

Eine Einzelbewertungsfunktion  $M^A$  des abstandsorientierten Merkmals A für die gesamte Auftragssequenz  $R^A$  wird berechnet als Mittelwert aller Gewichtungen, die das Merkmal A entlang dieser Auftragssequenz  $R^A$  aufweist. Dabei wird allen Abständen  $i$ , die größer sind als der Mindestabstand  $i(\text{opt})$ , eine Belastung von 100% zugeordnet. Der Grund hierfür besteht darin, daß die für die Ausbildung des Merkmals A benötigte Kapazität (z. B. das Montageteam) bereitsteht, auch wenn ein größerer als der ideale Abstand  $i(\text{opt})$  zwischen zwei Einzelaufträgen auftritt. Den Abständen  $i$ , die kleiner sind als der Mindestabstand  $i(\text{opt})$ , wird eine Belastung von  $i(\text{opt})/i$  zugeordnet, die immer größer ist als 100%. Die Einzelbewertungsfunktion  $M^A$  ist somit immer  $\geq 100\%$ ; sie ist umso größer, je öfter und/oder stärker der Abstand  $i$  den Mindestabstand  $i(\text{opt})$  unterschreitet, und nimmt nur dann den Wert 100% an, wenn alle Abstände  $i$  des Merkmals A in der Auftragssequenz größer oder gleich dem Mindestabstand  $i(\text{opt})$  sind.

Ist die Häufigkeit der Einzelaufträge, die das abstandsorientierte Merkmal A (z. B. Klimaanlage) aufweisen, im Mittel so hoch, daß eine dauernde Überlastung des Montageteams auftritt, so kann es günstig sein, ein zweites Montageteam bereitzustellen, für das ebenfalls ein Mindestabstand  $i(\text{opt})$  vorgesehen werden sollte. Dies führt zwar einerseits zu zusätzlichen Personalkosten, bringt aber andererseits eine Reduktion der Einzelbewertungsfunktion(en) mit sich, da sich ja nun im Mittel für jedes Montageteam der Abstand  $i$  zwischen einzubauenden Klimaanlagen in der Auftragssequenz verdoppelt. Die Einzelbewertungsfunktion  $M^A$  ist somit eng mit den Kosten korreliert, die mit der Abarbeitung einer bestimmten Auftragsreihenfolge  $R^A$  verbunden sind.

Im Gegensatz zu den abstandsorientierten Merkmalen zeichnen sich die dichteorientierten Merkmale dadurch aus, daß sie relativ häufig angefordert werden. So treten z. B. dichteorientierte Merkmale im statistischen Mittel mit einer Häufigkeit von mehr als etwa 30% auf. Um eine hohe Auslastung der zugehörigen Fertigungsstationen (Lackierung, Montagebänder der einzelnen Baureihen etc.) sicherzustellen, werden an diesen Fertigungsstationen Driftbereiche eingerichtet, in die die für das jeweilige Merkmal vorgesehenen Fahrzeuge eingereiht werden. So sind z. B. in der Lackierung Farbsortierpuffer vorgesehen, von der aus die Lackieranlagen beschickt werden. Diese Farbsortierpuffer gestalten eine lokale Umordnung und somit Feinabstimmung der Beschickungsreihenfolge, um eine optimale Auslastung der Lackierstationen zu ermöglichen (z. B. um einer für optimale Auslastung geltenden Regel: "Fünf aufeinanderfolgende Karosserien werden in derselben Farbe lackiert, dann erfolgt Farbwechsel" Genüge zu tun). Im Interesse der Raum- und Kostenersparnis sollten die Farbsortierpuffer möglichst klein gewählt werden; damit dennoch eine gleichmäßige Beschickung der Lackieranlagen sichergestellt werden kann, müssen diese kleinen Puffer zu jedem Zeitpunkt eine genügend große, aber nicht zu große Zahl von Karossen enthalten, die in derselben Farbe lackiert werden sollen. Dies setzt voraus, daß für jede Farbe pro Zeitintervall nur eine bestimmte Maximalanzahl von Karossen an den Farbsortierpuffern eintrifft, d. h. daß eine gewisse Maximaldichte des (Farb-) Merkmals nicht überschritten wird.

Fig. 4a zeigt einen Ausschnitt aus einer Einzelauftragsse-

quenz  $R^D$  eines dichteorientierten Merkmals  $D$ , dessen lokale Dichte über einen gleitenden Block der Länge  $L = 7$  berechnet wird. Die lokale Dichte des Merkmals  $D$  entspricht der Häufigkeit der Einzelaufträge im lokalen Block der Länge  $L$ , die dieses Merkmal  $D$  aufweisen. Im vorliegenden Fall möge die Maximaldichte des Merkmals  $D$  bei  $j(\text{opt})/L = 4/7$  liegen. Wie aus Fig. 4a hervorgeht, ist diese Maximaldichte an einer Stelle überschritten, an der die lokale Dichte  $j/L = 5/7$  beträgt. Diese erhöhte Dichte  $j/L$  führt zu einer Überladung der zugehörigen Driftbereiche und ist umso gravierender, je stärker die lokale Dichte  $j/L$  von der Maximaldichte  $j(\text{opt})/L$  abweicht. Im vorliegenden Beispiel wird diese Überladung modelliert durch ein lineares Ansteigen der Gewichtungsfunktion  $P^D(j, j(\text{opt}), L)$  bei zunehmenden lokalen Dichten  $j/L$ , mit denen das Merkmal  $D$  in einem Block der Länge  $L$  auftritt (siehe Fig. 4b).

Analog zu den abstandsorientierten Merkmalen wird auch für das dichteorientierte Merkmal  $D$  eine Einzelbewertungsfunktion  $M^D$  der Auftragssequenz  $R^D$  berechnet als der Mittelwert aller Gewichtungen, die das Merkmal  $D$  entlang dieser Auftragssequenz  $R^D$  aufweist. Dabei wird allen Dichten  $j/L$ , die kleiner sind als die Maximaldichte  $j(\text{opt})/L$ , eine Belastung von 100% zugeordnet; dies modelliert die Tatsache, daß der diesem Merkmal  $D$  zugehörige Driftbereich bereitgestellt wird, auch wenn pro Blocklänge  $L$  weniger Karossen dieses Merkmals  $D$  als erwartet an dem Driftbereich eintreffen. Den Dichten  $j/L$ , die größer sind als die Maximaldichte  $j(\text{opt})/L$ , wird eine Belastung von  $j/j(\text{opt})$  zugeordnet, die immer größer ist als 100%. Die Einzelbewertungsfunktion  $M^D$  ist somit immer  $\geq 100\%$ . Sie ist umso größer, je öfter und/oder stärker die Dichte  $j/L$  den Maximalwert von  $j(\text{opt})/L$  überschreitet, und nimmt nur dann den Wert 100% an, wenn die lokale Dichte  $j/L$  des Merkmals  $D$  überall in der Auftragssequenz  $R^D$  geringer oder gleich der Maximaldichte  $j(\text{opt})/L$  ist.

Ähnliches wie für die obengenannten Farbsortierpuffer für die Lackierung gilt für die Auslegung der Driftbereiche, die für die Beschickung der Montagebänder unterschiedlicher Baureihen etc. vorgesehen sind. Die Merkmalsfamilien "Baureihe", "Motorvariante" etc., die – bezogen auf den Gesamtauftrag – mit einer vergleichsweise hohen Häufigkeit auftreten (30% oder mehr), so daß zu ihrer Ausbildung eigene Fertigungsanlagen bzw. Montagebänder mit dazugehörigen Driftbereichen bereitgestellt werden, werden somit als dichteorientierte Merkmale behandelt.

Die oben beschriebene Modellierung der dichte- bzw. abstandsorientierter Merkmale mit Hilfe eines linearen bzw. geometrischen Verlaufs der Belastungskurven bei überhöhten Dichten bzw. zu geringen Abständen ist keineswegs die einzig mögliche Beschreibung des Verhaltens dieser Merkmale. Auch andere funktionale Abhängigkeiten der Belastungskurven sind denkbar, z. B. ein exponentielles Anwachsen der Belastung bei zu geringen Abständen für abstandsorientierte Merkmale, oder ein nichtlinear ansteigender Verlauf der Belastung bei zu hohen Dichten für dichteorientierte Merkmale. Die Wahl einer geeigneten Belastungskurve für jedes einzelne Merkmal (insbesondere, wenn hierfür Erfahrungs- oder Meßgrößen vorliegen) ermöglicht eine quantitative, realitätsnahe und transparente Einbeziehung der mit diesem Merkmal verbundenen Herstellungskosten in die Gesamtbetrachtung der Auftragsreihenfolge.

Wurde in der gegebenen Auftragsreihenfolge  $R_0$  für jedes dichte- oder abstandsorientierte Merkmal  $Z$  eine Einzelbewertungsfunktion  $M_0(Z)$  bestimmt (wobei z. B. für das abstandsorientierte Merkmal  $A$  die Funktion  $M_0(A)$  den Wert  $M^A$ , für das dichteorientierte Merkmal  $D$  die Funktion  $M_0(D)$  den Wert  $M^D$  besitzt), so läßt sich nun die Gesamtbewertungsfunktion  $\Gamma_0$  dieser Auftragsreihenfolge  $R_C$  berech-

nen: Sie wird gebildet als eine Linearkombination der Einzelbewertungsfunktionen  $M_0(Z)$ :

$$\Gamma_0 = \sum_{Z=1}^{Z=\text{Max}} (\gamma^Z \times M_0(Z)) / \sum_{Z=1}^{Z=\text{Max}} (\gamma^Z)$$

wobei  $\text{Max}$  die Gesamtzahl der die Auftragsreihenfolge  $R_0$  charakterisierenden Merkmale  $Z$  bezeichnet. Der Parameter  $\gamma^Z$  bezeichnet einen Gewichtungsfaktor, der den (kostenrelevanten) Beitrag des Merkmals  $Z$  zur Gesamtbewertungsfunktion  $\Gamma_0$  beschreibt: Ist z. B. für die Ausbildung eines Merkmals  $Z_1$  ein hochqualifiziertes (und daher hochbezahltes) Montageteam oder eine Maschine mit hohen Betriebskosten notwendig, so ist der Gewichtungsfaktor  $\gamma^{Z_1}$ , mit der zugehörigen Einzelbewertungsfunktion  $M_0(Z_1)$  in die Gesamtbewertungsfunktion  $\Gamma_0$  eingeht, größer als der Gewichtungsfaktor  $\gamma^{Z_2}$  eines Merkmals  $Z_2$ , das durch ein weniger kostenintensives Montageteam bzw. eine kostengünstigere Maschine hergestellt wird. Die Gewichtungsfaktoren  $\gamma^Z$  können somit der Kostensituation bei der Fertigung der einzelnen Merkmale  $Z$  angepaßt werden.

Die Gesamtbewertungsfunktion  $\Gamma_0$  ist ein Maß dafür, wie "kostengünstig" die Auftragsreihenfolge  $R_0$  gefertigt werden kann: Im finanziell günstigsten Fall, d. h. wenn für jedes Merkmal  $Z$  die Einzelbewertungsfunktion  $M_0(Z) = 100\%$  beträgt (wenn also keine einzige Dichte- bzw. Abstandsverletzung in den Merkmalsreihenfolgen auftreten), so nimmt die Gesamtbewertungsfunktion den Wert  $\Gamma_0 = 100\%$  an. Jede Dichte- bzw. Abstandsverletzung von Merkmalen führt zu einer Erhöhung der zugehörigen Einzelbewertungsfunktionen und somit zu einer Gesamtbewertungsfunktion  $\Gamma_0 > 100\%$ . In diesem Fall muß, ausgehend von der (zufällig zusammengestellten) Ausgangs-Auftragsreihenfolge  $R_0$ , diejenige Optimal-Auftragsreihenfolge  $R_{\text{opt}}$  gefunden werden, die zu einem Minimalwert der zugehörigen Gesamtbewertungsfunktion  $\Gamma_{\text{opt}}$  führt; dieser Minimalwert sollte möglichst nahe bei 100% liegen.

Zur Bestimmung der Optimal-Auftragsreihenfolge  $R_{\text{opt}}$  wird zweckmäßigerweise das Verfahren der genetischen Algorithmen verwendet: Jede Auftragsreihenfolge  $R$  entspricht hierbei einem Individuum. Eine Population solcher Individuen wird zufällig erzeugt, der "Fitneßfaktor" jedes Individuums wird ermittelt durch Berechnung der oben beschriebenen Gesamtbewertungsfunktion  $G_R$  der zugehörigen Auftragsreihenfolge  $R$ . Anschließend wird insbesondere folgender Evolutionsschritt wiederholt durchgeführt: Drei Individuen werden aus der Population ausgewählt. Dasjenige Individuum aus diesen dreien, das den schlechtesten "Fitneßfaktor" hat, wird aus der Population entfernt und durch eine Kombination aus den beiden besseren ersetzt (wobei, je nach Art und Gewichtung der Merkmale in der Auftragsreihenfolge  $R$ , die Kombination unterschiedlich angepaßt werden kann). Im Sinne der Evolution wird also durch die genetischen Algorithmen die Population ständig verbessert. Der Vorgang ist abgeschlossen, wenn der "Fitneßfaktor" (d. h. die zugehörige Gesamtbewertungsfunktion) einen im voraus festgelegten Zielwert erreicht hat – oder wenn der "Fitneßfaktor" eine Sättigung erreicht durch weitere Evolutionsschritte nicht mehr verbessert werden kann.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Festlegung einer Auftragsreihenfolge für Fertigungsanlagen, insbesondere für Fertigungsanlagen in der Automobilherstellung, wobei die Auftragsreihenfolge aus einer Sequenz von Einzelaufträ-

gen besteht,

- wobei jeder Einzelauftrag durch einen Satz technischer Merkmale charakterisiert wird, der die Anforderungen dieses Einzelauftrages an bereitzustellende Fertigungskapazitäten beschreibt,
- wobei zur Bewertung einer gegebenen Auftragsreihenfolge zunächst jedem Merkmal eine Einzelbewertungsfunktion zugeordnet wird,
- wobei anschließend aus einer gewichteten Kombination der Einzelbewertungsfunktionen eine Gesamtbewertungsfunktion der Auftragsreihenfolge gebildet wird,
- und wobei schließlich aus der Vielzahl der möglichen Auftragsreihenfolgen diejenige ausgewählt wird, die sich durch einen vorgegebenen Wert der Gesamtbewertungsfunktion auszeichnet,
- wobei zur Bestimmung der Einzelbewertungsfunktionen jedes Merkmal entweder als abstandsorientiert oder als dichteorientiert charakterisiert wird,
- und wobei die Einzelbewertungsfunktion  $M^A$  eines abstandsorientierten Merkmals A folgendermaßen berechnet wird:

$$M^A = \left[ \sum_{i=1}^{I-MAX} n_i \cdot f^A(i, i(opt)) \right] / \left[ \sum_{i=1}^{I-MAX} n_i \right] \quad 25$$

- wobei MAX die Zahl der Einzelaufträge in der gegebenen Auftragsreihenfolge ist,
- wobei  $n_i$  angibt, wie häufig in der gegebenen Auftragsreihenfolge der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Auftritten des abstandsorientierten Merkmals A den Wert i annimmt,
- wobei  $i(opt)$  ein fertigungslogistisch optimaler Mindestabstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Auftritten des abstandsorientierten Merkmals A ist,
- und wobei  $f^A(i, i(opt))$  die Gewichtungsfunktion des abstandsorientierten Merkmals A ist;
- während die Einzelbewertungsfunktion  $M^D$  eines dichteorientierten Merkmals D folgendermaßen berechnet wird:

$$M^D = \left[ \sum_{j=1}^{J-L} n_j \cdot f^D(j, j(opt), L) \right] / \left[ \sum_{j=1}^{J-L} n_j \right] \quad 45$$

- wobei L die Länge eines Blocks von Aufträgen bedeutet, über die die Dichte des Merkmals D berechnet werden soll,
- wobei  $j(opt)$  die fertigungslogistisch optimale Häufigkeit beschreibt, mit der das dichteorientierte Merkmal D in einem Auftragsblock mit L aufeinanderfolgenden Aufträgen auftritt,
- wobei  $n_j$  angibt, wie häufig es in der gegebenen Auftragsreihenfolge vorkommt, daß in einem Auftragsblock mit L aufeinanderfolgenden Aufträgen das Merkmal D genau j-mal vertreten ist,
- und wobei  $f^D(j, j(opt), L)$  die Gewichtungsfunktion des dichteorientierten Merkmals D ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Gewichtungsfunktion  $f^A(i, i(opt))$  des abstandsorientierten Merkmals A folgende funktionale Form annimmt:

$$f^A(i, i(opt)) = i(opt)/i \cdot 100\% \text{ für } 1 \leq i \leq i(opt)$$

$$f^A(i, i(opt)) = 100\% \text{ für } i(opt) < i \leq MAX$$

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Gewichtungsfunktion  $f^D(j, j(opt), L)$  des dichteorientierten Merkmals D folgende funktionale Form annimmt:

$$f^D(j, j(opt), L) = 100\% \text{ für } 1 \leq j < i(opt)$$

$$f^D(j, j(opt), L) = j/j(opt) \cdot 100\% \text{ für } j(opt) \leq j \leq L$$

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß aus der Vielzahl der möglichen Auftragsreihenfolgen diejenige ausgewählt wird, die sich durch einen Minimalwert der Gesamtbewertungsfunktion auszeichnet.

5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur Vorgabe und/oder Bewertung von Auftragssequenzen genetische Algorithmen herangezogen werden, wobei die Gesamtbewertungsfunktion als Fitnessfunktion verwendet wird.

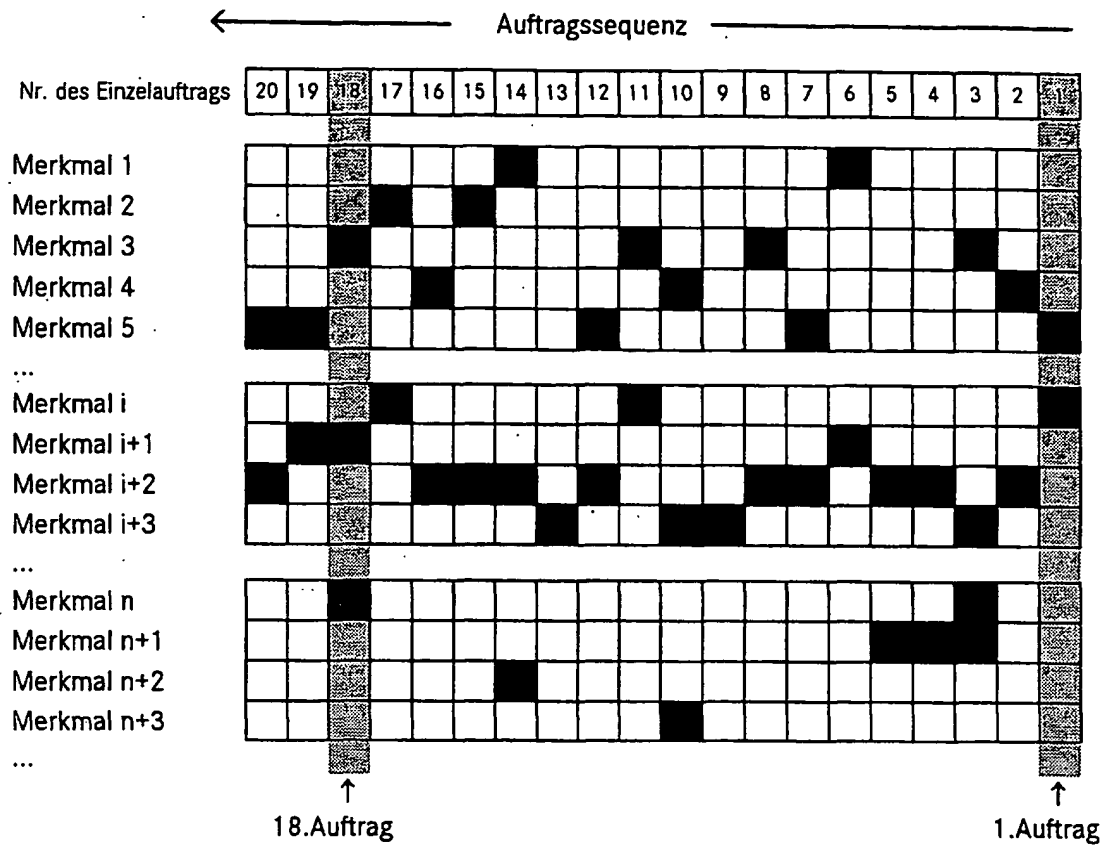
---

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

---

Merkmal 1:	Lackfarbe signalrot
Merkmal 2:	Lackfarbe bordeauxrot metallic
Merkmal 3:	Lackfarbe surfblau
Merkmal 4:	Lackfarbe nachtblau metallic
Merkmal 5:	Lackfarbe weiß
...	...
Merkmal i:	4-Gang-Schaltgetriebe
Merkmal i+1:	5-Gang-Schaltgetriebe
Merkmal i+2:	4-Gang-Automatikgetriebe
Merkmal i+3:	5-Gang-Automatikgetriebe
...	...
Merkmal n:	elektrische Fensterheber
Merkmal n+1:	Klimaanlage
Merkmal n+2:	Schiebedach
Merkmal n+3:	Funktelefon
...	...

**FIGUR 1**

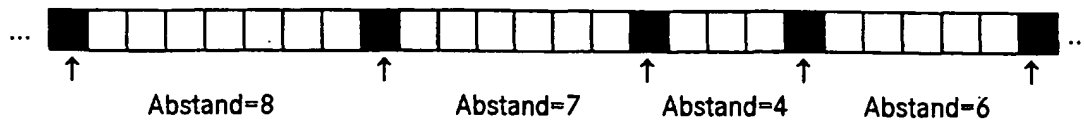


- Merkmal im Auftrag gesetzt  
 Merkmal im Auftrag nicht gesetzt

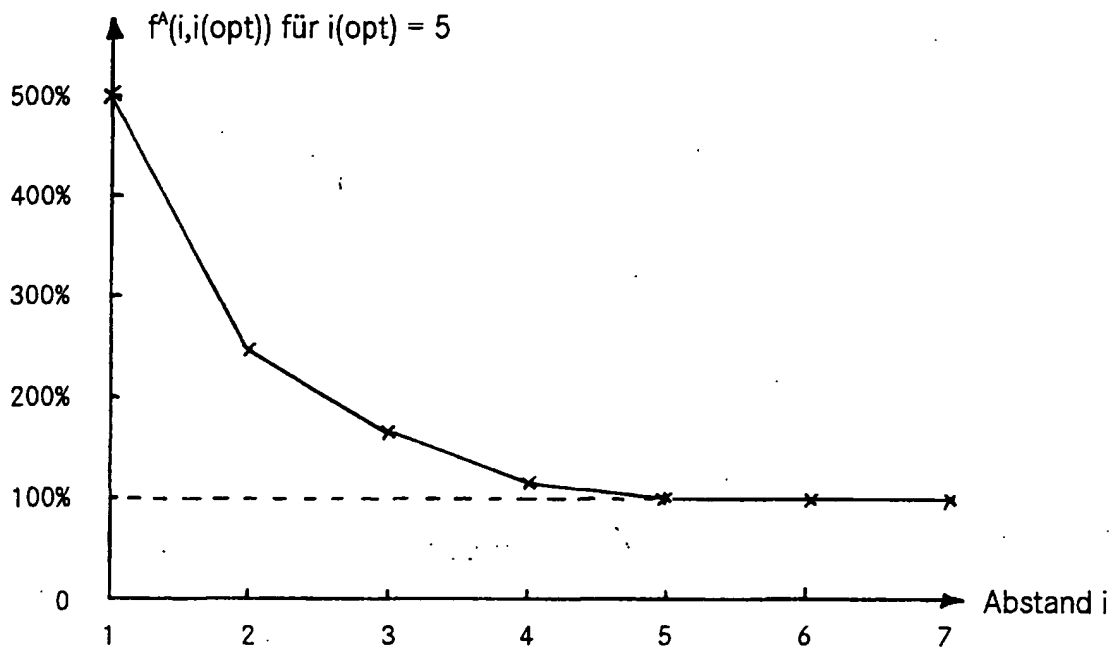
**FIGUR 2**



Sequenz des abstandsorientierten Merkmals „Schiebedach“:

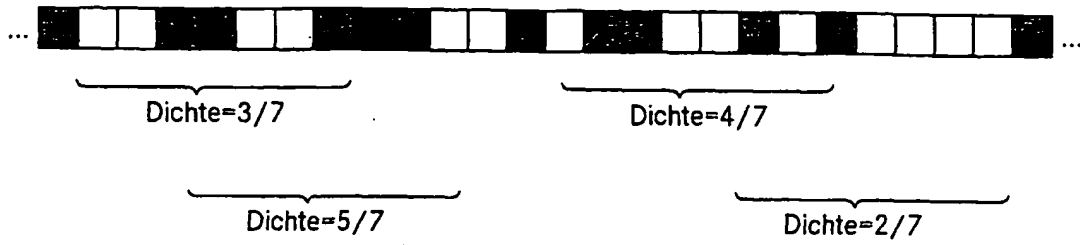


**FIGUR 3a**

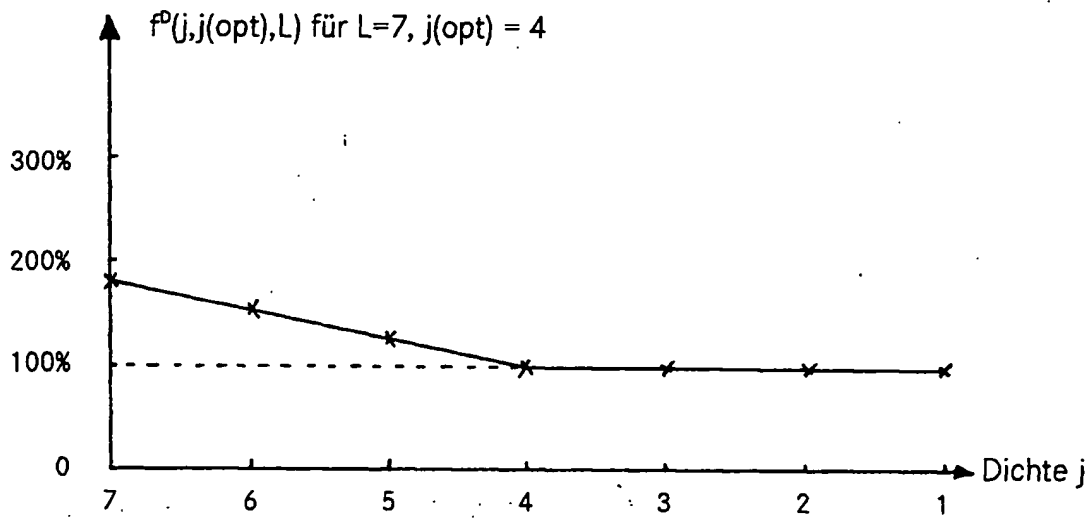


**FIGUR 3b**

Sequenz des dichteorientierten Merkmals „Lackfarbe signalrot“ mit Blocklänge  $L=7$ :



**FIGUR 4a**



**FIGUR 4b**

**Production sequence planning method for automobile production line uses evaluation of technical requirements for each production step and overall evaluation functions for optimization of production logistics**

**Patent number:** DE19902056  
**Publication date:** 2000-10-19  
**Inventor:** DAFERNER MARTIN (DE)  
**Applicant:** DAIMLER CHRYSLER AG (DE)  
**Classification:**  
- **International:** G05B13/04; G06F17/60  
- **European:**  
**Application number:** DE19991002056 19990120  
**Priority number(s):** DE19991002056 19990120

**Report a data error here**

**Abstract of DE19902056**

The method has each individual production stage characterized by a set of technical requirements, each of which is evaluated by a respective function, with combining of the weighted functions to provide an overall evaluation function for the production step and selection of the production sequence from a number possible production sequences in dependence on the values of the overall evaluation functions, to provide optimum production logistics.

---

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide